用于往复压缩机运行状态自动控制的光纤传感

多参量实时监测系统

武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室

童杏林

# 一、国内外现状、发展趋势及开题意义

## 1.1往复压缩机的常见故障类型及故障原因

往复式压缩机是石油化工领域中重要的炼油工艺设备，主要有催化、裂化重整和加氢压缩、焦化气压缩等重要作用。要求压缩机必须做到整体性能好，效率高，结构紧凑，运转平稳可靠，无故障长时间运转，而且可以满足各种工况的需要。压缩机的非正常停机往往给生产造成巨大的损失，同时带来高额的维修费用，甚至可能存在人员伤亡的危险。因此对往复压缩机的健康状况进行监测意义重大。

往复压缩机发生故障的部位基本上是由下列3部分组成：

1. 传递动力部分——曲轴、连杆、十字头、活塞销、活塞等零部件故障
2. 气体的进出机器密封部分——气缸、进气和排气阀门、弹簧、阀片、活塞环、填料函及排气量调节装置等部分故障
3. 辅助部分——包括水、气、油三路的各种冷却器、缓冲器、分离器、油泵、安全阀及各种管路系统方面的故障。

往复压缩机故障按机理可分成两大类：一类是流体性质的，属于机器热力性能故障，如压缩机的排气量变化，吸排气压力变化，各部分温度变化以及油路、水路故障所表现出来的热力参数变化，如表1所示；另一类是机械性质的，属于机械功能故障，如压缩机的主要零部件的缺陷、磨损、损坏和断裂故障所表现出来的机器振动和不正常声音，如表2所示。引起故障的原因各不相同，确定故障所采集的信号所使用的方法也应有所不同。

表1　往复压缩机热力性能故障类型及起因

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 类型 | 现象 | 引起故障的原因 |
| 热力性能故障 | 排气量不足 | 气阀泄漏,活塞组件泄漏、填料漏气、管路  连接法兰垫片破损等。 |
| 压力不正常 | 压力表失常、吸气压力低、气阀泄漏、油路  堵塞、水压不正常等。 |
| 温度异常 | 气缸拉伤、水路故障、填料函故障、形位超  差、气阀泄漏等。 |

表2　往复压缩机机械性能故障类型及起因

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 类型 | 现象 | 引起故障的原因 |
| 机械性能故障 | 异常振动 | 间隙过大,管路气流脉动,联接松动,过度  磨损等 |
| 异常响声 | 活塞故障,间隙超差,联接松动,阀组损坏  等 |
| 过热 | 气缸过热,轴承过热,活塞杆过热,十字头  过热等 |

## 1.2往复压缩机的运行状况监测技术国内外现状及发展趋势

由于往复式压缩机结构复杂且运行过程中激振源多，因此对于如何切实有效的对其进行故障诊断确实是一个科研难题。为此，国内外的专家学者以及从事设备维护的科研人员都进行了深入的研究，采用了多种的检测手段，传统的往复式压缩机的监测主要采用点检的手段，点检主要是通过人的感官或者简单的工具、仪器，按照预先设定的周期和方法，对设备上的规定部位进行预防性检查，该方法只能对部分非常明显的问题进行识别，而且很可能因为没能及时发现问题而导致更严重的故障。目前，一些电类传感器被用于往复压缩机的温度、压力、振动等参量的监测上，但是这些电类传感器有诸多不足：如热电偶低温测量精度偏低；热敏电阻线性度差、可靠性低；辐射式温度计精度低，抗干扰能力也差。电类传感器采用电输入，容易受到电磁干扰影响测量精度，特别是石化生产装置大多数在高温、高压、易燃、易爆、腐蚀等条件下长周期连续生产，因此对传感器的防爆要求特别高，实现起来特别困难，而且存在安全隐患，很难满足实际生产的需要。

光纤传感技术是一种新兴传感技术，能以高分辨率测量许多物理参数（如应力、应变、温度等）。与传统的电类传感器相比，光纤传感器具有许多优点，概括如下：

1. 高灵敏度

(2)轻细柔韧便于嵌入被测物体内部进行安装埋设

(3)电绝缘性及化学稳定性。光纤本身是一种高绝缘、化学性能稳定的物质，适用于电力系统及化学系统中需要高压隔离和易燃易爆等恶劣的环境中。

(4)良好的安全性。光纤传感器是电无源的敏感元件，故应用于测量中时，不存在漏电及电击等安全隐患。

(5)抗电磁干扰。一般情况下光波频率比电磁辐射频率高，因此光在光纤中传播不会受到电磁噪声的影响。

(6)可分布式测量。一根光纤可以实现长距离连续测控，能准确测出任一点上的温度、应变、损伤和振动等信息，并由此形成具备很大范围内的监测区域，提高对环境的检测水平。

1. 使用寿命长。光纤的主要材料是石英玻璃，外裹高分子材料的包层，这使得它具有相对于金属传感器更大的耐久性。
2. 传输容量大。以光纤为母线，用传输大容量的光纤代替笨重的多芯水下电缆采集收纳各感知点的信息，并且通过复用技术，来实现对分布式的光纤传感器监测。

正是因为光纤传感有以上技术优势，近年来光纤传感技术得到了快速的发展，为机械系统的健康状况监测与故障诊断提供了一种新的技术方法。美国、英国及德国等发达国家的研究人员先后采用光纤传感技术监测机械设备的运行状况，国内相关研究人员也开展了这方面的研究，如佟庆彬等设计了用于高速旋转机械径向振动检测的反射式光强调制型非接触式光纤传感系统；曹靳等提出了一种基于FBG传感器的故障状态监测方法；彭岳伦等对光纤光栅在机械的轴承温度监测系统中的应用进行了研究。

光纤传感技术由于本征安全在化工行业具有特别广阔的应用前景，目前，相关研究主要集中在装备整体健康状态监测，如动力车间的空压机组以及其他装置的大型压缩机的运行等。近年来少数研究团队开始探索采用光纤传感技术监测和诊断往复压缩机的运行和健康状况，武汉理工大学光纤技术国家工程实验室童杏林教授多年来在研究光纤传感技术石化行业的工程化方面做了大量工作，研究了石化行业现场应用的光纤温度、压力、位移、振动、声学及氢气等气体成分在线监测多类传感器，取得了良好的应用效果，多类应用研究成果处于国际领先水平，在往复压缩机方面，该研究团队提出并开展了往复式压缩机的十字头轴瓦温度在线监测技术研究，该团队的水力除焦在线监测系统可实现除焦控制的全自动化，为该光纤传感监测技术作为全自动控制闭环反馈系统中的一部分提供了应用范例，基于此，本课题拟利用童杏林教授在光纤温度、位移、振动和声学等传感监测技术方面研究基础，与往复压缩机自动控制技术相结合，研究形成一种全新的用于往复压缩机运行状态自动控制的光纤传感多参量实时监测系统。

从现有文献看，童杏林教授团队提出的研究方法在国内外尚属首次，具有很大的创新性，该技术方法的研究成功可望真正实现对往复压缩机健康状况的准确判断和合理的自动控制。该项成果将会为石化往复式压缩机安全、稳定、高效运行，降低运行成本提供技术保障，具有巨大的经济价值和重要的社会价值。

## 1.3与中国石化主业发展的关联度

在石油企业进行石油炼制的过程当中，往复式压缩机的应用是非常广泛的，它的使用涉及到催化裂化反应，石油产品的脱硫、加氢等重点的工艺过程。

它的主要特点是结构复杂、机械部件多、机器所处的环境比较恶劣，所以往复式压缩机在应用时也会存在很多故障及失效的问题。由于基于光纤传感的往复式压缩机的在线监测技术具有结构简单、体积小、适合嵌入机械结构中、可测量内部的温度、稳定性好、重复性好、抗腐蚀、抗电磁干扰、可波分复用等优点，非常适合用于往复式压缩机的在线监测，因此，用于往复压缩机运行状态自动控制的光纤传感多参量实时监测系统与中国石化发展息息相关，不仅可以保证企业的生产能高效顺利进行，降低生产成本，也可提高企业的产品质量与经济效应。

## 1.4项目的创新性

针对中国石化企业往复式压缩机的故障诊断、运行状态监测和自动控制困难及对人力和物力消耗都比较大等问题，从设备本身的实际出发，研究一种全新的用于往复压缩机运行状态自动控制的光纤传感多参量实时监测系统，是一项具有创新意义的工作，其创新性主要体现在：

1. 首次提出将光纤传感技术应用于往复式压缩机的十字头轴瓦温度监测，采用一定的方式将特制尺寸微小、易于安装的高温光纤传感探头安装于往复式压缩机十字头轴瓦上，不破坏设备的固有结构。实现了无电检测，非常适合于石化行业易燃、易爆的危险场合；
2. 用于往复压缩机运行状态自动控制的光纤传感多参量实时监测系统采用特定的无线传输装置将光源信号无线传输到十字头轴瓦内部的高温光纤传感探头上，并将信号光无线传输到信号解调单元，彻底解决了传输线和连杆、十字头缠绕的问题，真正意义上实现了对往复式压缩机的十字头轴瓦的实时在线监测，对及时发现设备的潜在故障、确保设备安全具有重要意义；
3. 通过光纤位移传感器对往复压缩机运行状况进行监测，将采集到信号转化为自动控制所需的电流信号，通过PLC与控制系统联动，实现往复压缩机的自动化控制；
4. 将基于光纤传感技术的往复式压缩机的的实时在线监测系统硬件与自动控制系统融为一体，真正地实现了对往复式压缩机的十字头轴瓦的实时在线监测、故障专家诊断和自动控制，保证设备的安全稳定运行，节省能耗，延长设备工作时间，提高生产效益。

# 二、项目技术内容和技术方法

因此本课题提出了一种用于往复压缩机运行状态自动控制的光纤传感多参量实时监测系统。该监测系统主要由服务器、工作站、数据采集器、前置放大调理器、传感器（温度、压力、位移、加速度传感器）、通讯网络等硬件以及采集、通信、处理、分析等软件组成。传感器采集到的信号通过前置放大调理器放大后进入数据采集器；数据采集器与工作站通过通讯总线，传递指令及交换数据，同时可将信号传输到PLC系统，从而对压缩机做出相应的控制；服务器通过网络接收数据，并对数据进行分析、保存、报警及联锁控制，实现远程数据通信、监控。图1为该系统的组成示意图。



图1 往复压缩机状态多参量在线实时监测系统

目前该监测系统主要具有以下监测、分析功能

（1）活塞松动，主轴瓦、十字头轴瓦松动磨损。

（2）活塞杆下沉、填料和支撑环磨损、缸套磨损

（3）活塞杆超负荷

（4）气阀、活塞环泄露。

通过理论分析和实践经验可确定该往复压缩机在线实时监控系统主要监测参数有气缸压力、活塞杆位移、机械振动、温度。目前主要采用电类传感器进行参数采集，但是，由于化工工业对于现场的电的使用有着苛刻的要求，电类传感器采用电输入，容易受到电磁干扰影响测量精度，特别是石化生产装置大多数在高温、高压、易燃、易爆、腐蚀等条件下长周期连续生产，因此对传感器的防爆要求特别高，并且该类传感器存在温度稳定性差、信号无法进行长距离传输等诸多问题。光纤传感技术是一种新兴传感技术，具有可实现现场无电检测，适宜构建分布式传感网络，传感器结构耐腐蚀性好，监测信号采用光缆传输，满足无中继远传等特点，克服了传统监测的技术的诸多不足，因此现代往复压缩机监测系统中越来越多的采用光纤传感器，本系统中采用光纤传感器进行数据采集。项目技术内容与方法如下：

**1、振动监测**

本项目提出的往复压缩机长期实时在线监测系统的基本原理是：利用高精度、远距离的光纤F-P传感技术，通过对压缩机组压缩机缸盖部位振动实时、在线的长期监测，以期对往复式压缩机的整体运行状态和安全性做出准确的判断，为压缩机使用、维修提供依据，从而提高压缩机组的经济性和安全性。



图2 往复压缩机光纤F-P传感振动监测系统原理图

如图2，监测系统由硬件系统和软件系统构成。硬件系统由传感器、测试二次仪表、网络通信设备、PLC控制系统和计算机等构成；软件系统由各种硬件设备的驱动、控制及通信软件构成，同时还包含对所测量的数据进行处理的数据库管理、专家系统评估软件等。由软件和硬件系统密切配合实现长期实时在线健康监测及状况评估的功能。

振动监测主要是监测振动速度和振动加速度变化，速度传感器和加速度传感器均为F-P传感器，F-P速度传感器安装在曲轴箱体上。F-P加速度传感器通常安装布置在气缸盖上。振动参数可以作为压缩机安全保护的有效参数。监测系统设有安全报警线和安全联锁停车线。当振动超过安全报警线对应的值时，发出报警信号；当达到安全联锁线对应的值时，通过PLC控制系统发出自动联锁停车信号将压塑机停车。同时振动也是反映往复压缩机机械方面是否正常的敏感参数。压缩机的机械动力性故障，如吸、排气阀损坏，活塞环磨损，活塞杆填料函磨损，连杆十字头磨损，连杆螺栓及十字头螺栓松动等，都会产生相应的振动。现场光纤F-P振动信号经光缆汇集传回监控室接入光纤F-P解调器，传感器的出纤采用金属软管保护，保护范围从传感器出纤口到集线箱，经采集、软件分析处理后的结果存入服务器。通过本地客户端计算机进行实时监控和查询，该系统留有互联网接口，可实现远程访问和控制。

**2、位移监测**

往复式压缩机通常用支承环以减小气缸套磨损和由于活塞与气缸接触带来的损害，一旦支承环严重磨损或断裂很容易发生拉缸乃至活塞杆断裂的恶性事故。

由于活塞杆断裂而引发其他零部件连锁性破坏，使高压易燃气体泄露，引起爆炸和大火，造成重大人员伤亡和严重经济损失的严重事故时有发生，监测支承环的磨损状态就显得尤为重要。具体方案如下图3：

活塞杆位移位移



图3 往复压缩机光纤位移传感监测方法原理图

传感器选择特性曲线具有足够线性范围的光纤位移传感器。测量活塞一个完整冲程的位移的平均值，将平均值与标准允许跳动值进行比较，将4~20mA的监测信号送到PLC中，根据运行情况对压缩机运行进行自动控制调整，使其正常高效工作。还可根据监测数据判断往复压缩机活塞杆支承环损坏情况，从而发出自动联锁停车信号将压塑机停车并进行检修处理。

**3、温度监测**

温度是反映往复压缩机运转是否正常的最敏感参数。通过监测压缩机的进、排气温度可间接了解气阀和气缸组件的工作填装。同时温度也可反映压缩机的机械性能，例如主轴瓦、十字头轴瓦等的磨损情况。其中十字头轴瓦的温度的监测是重点也是难点，十字头是连接压缩机连杆和活塞杆的部件，在滑道上作往复运动，起导向作用；十字头轴瓦承受强大的冲击负荷，摩擦、磨损大，工作条件最恶劣，最易出现故障。十字头轴瓦因摩擦和冲击导致温度过高是其损坏的最主要原因，十字头轴瓦损坏将会造成极大的经济损失和安全事故，通过在线监测十字头轴瓦温度可以提前检测到十字头轴瓦的健康状况，保证压缩机正常安全运行。正因为如此，国内外石化企业都迫切希望能够获得一种对往复式压缩机的十字头轴瓦温度进行在线监测的可靠技术手段。

将特制尺寸微小、易于安装的高温光纤传感探头采用一定的方式安装于往复式压缩机十字头轴瓦上，在线探测十字头轴瓦在不同温度工作状态下的光信号，通过特定的无线传输装置将将光源信号无线传输到十字头轴瓦内部的高温光纤传感探头上，并将信号光无线传输到信号解调单元，经过信号处理获得十字头温度实时变化量。该传感系统不破坏设备的固有结构，同时解决了传输线和连杆、十字头缠绕的问题，实现了无电检测，非常适合应用于石化行业易燃、易爆的危险场合。

本技术方法采用基于光纤光栅的传感原理，在吸取前期研究经验的基础上，采用多种方案并进，在实验和现场试验的实践中进行检验和优化，使整个监测系统满足往复式压缩机的十字头轴瓦温度在线监测要求。该技术方案下图4：



图4 往复式压缩机的十字头轴瓦的实时在线监测系统原理图

往复式压缩机的十字头轴瓦的实时在线监测系统主要包括光源、光信号无线传输单元、FBG温度传感器、信号解调单元等。将特制的高温传感探头采用特殊的方式均布于往复式压缩机十字头瓦上，作为温度探测单元提取所测各点处在不同温度工作状态下光信号，由经过特殊结构设计的无线传输单元导出所测传感光信号传输到信号解调单元，通过信号处理，获得十字头温度实时变化量，PC机与PLC通信，通过伺服电机控制往复压缩机冷却水系统和循环润滑系统，从而在非故障情况下迅速控制降低轴瓦的温度。对十字头轴瓦多点温度在线监测时，可以对监测部位对应设置一个或多个传感器，具体数目可根据实际情况需要进行设置，防止监测部位局部温度过高，引起误差。所采用的光信号无线传输技术，采用特殊结构设计，其光传感信号的耦合率高，能在恶劣环境中长期稳定工作；

解调仪与工控机通过以太网线连接，以传输采集的光波长信号。在线温度显示报警专家系统软件系统由温度监控报警系统软件与标定软件构成。两个软件均运行于解调仪表主机柜内的工业计算机中。温度监控报警系统软件长期不间断运行，实现光波长数据采集、数据分析、结果输出显示、高温预警等功能。标定软件为辅助软件，间歇运行，用于更新标定值来提高在线监测的准确度

## 三、总结

提出了一种用于往复压缩机运行状态自动控制的光纤传感多参量实时监测系统，可实现对往复压缩机各个工作与运行状态参数实时在线的综合监测和控制，系统将光纤FBG与F-P传感监测技术与自动控制技术集成在一起，对于保障往复式压缩机的整个系统正常工作，提高系统运作的可靠性与安全性，实现往复压缩机系统科学控制、故障的早期预防和诊断。随着我国工业4.0的智能制造的快速推进以及监测与故障诊断技术进一步的深入研究，现在的光纤传感技术、分布式计算技术及人工智能等技术为状态监测带了新的发展方向，将会对往复式压缩机同其他生产设备的协同生产能力提出了新的要求，因此，以该技术作为范本，通过后续集成更多新的技术，更好实现对石化整个设备网络系统的状态监测和自动控制。